

山はねに関する基礎的研究*

—— 急速な封圧除去による岩石の破壊挙動 ——

小林 良 二¹ 松 木 浩 二²
早 坂 匡 志³

1. 緒 言

鉱山における深部開発のみならず、トンネルの長大化などに伴って、山はねの予知とその防止の問題がますます重要になってきているが、その発生機構は未だ十分に解明されているとはいえない現状にある。

山はねが発生するためには、まず第一に、採掘や掘進に伴う地下空洞の幾何学的条件の変化や断層、褶曲などのような地質学的条件の変化によって、特定の岩盤領域に応力またはひずみエネルギーの集中が起り、その領域において破壊条件以上の応力が生ずることが必要であるとされている¹⁾。Rock noise (または、Acoustic emission) の測定は、この応力集中によって生ずる微小破壊の検知を目的としたものであると考えられる。

しかし、岩盤内に発生した集中応力がその岩盤強度を越えたとしても、破壊が急激に起るか否かは、応力集中の大きさとは別の問題であり、鉱柱などの特定領域における岩盤の強度破壊点以後の挙動と、その特定領域を囲む岩盤の剛性の大きさとの比較が重要であると考えられるようになった²⁾。これについては、空洞の幾何学的条件や岩石固有の急激な破壊のし易さが基本的な要因となる。

岩盤内は、多くの場合、三軸応力状態にあり、いまこれを Fig. 1 の応力円によって示すと、この応力状態から強度破壊に至る過程としては、(A) 最小主応力 (σ_3) を一定に保つたまま、最大主応力 (σ_1) が増加する場合の他に、(B) 主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) を一定に保つたまま最小主応力が低下する場合が考えられる。(A) の場合は、通常の三軸圧縮試験で数多く行なわれているが、岩盤内においては、空洞の

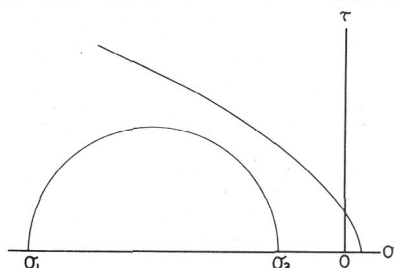


Fig. 1
Mohr's diagram for
discussion of rupture of
rock under triaxial
stress condition.

* 1978年2月6日受理 昭和46年3月日本鉱業会春季大会にて講演

1. 正会員 工博 東北大学教授 工学部資源工学科
2. 正会員 工博 東北大学助手 工学部資源工学科
3. 日本工営株式会社土木部

幾何学的形態の変化などによる応力の再配分の結果、最小主応力の低下を生じて破壊に至る可能性も十分考えられ、さらには、急速な最小主応力あるいは封圧の低下は、急激な破壊を引き起すと予想される。この破壊過程は、(B) の場合に相当し、現場の事例としては、空洞壁面の破壊に伴って誘発される岩盤の急激な破壊などが挙げられる。

そこで、本報では、前記(B)の場合における岩石の変形・破壊挙動を究明するため、三軸圧縮試験を行なつて、まず、岩石試験片を破壊条件に近い三軸応力状態におき、ついで、急速に封圧を除去した場合に、岩石試験片がどのような破壊挙動を示すかを調べ、一軸圧縮荷重下での剛性試験における破壊挙動との比較を行なつた結果について報告する。

2. 岩 石 試 料

供試岩石は、和泉砂岩(大阪府泉南郡淡輪産)、美唄炭鉱砂岩(北海道美唄炭鉱産)および東北大理石(岩手県東磐井郡大東町産)の3種であるが、それぞれの岩石の顕微鏡写真を Fig. 2 に示す。和泉砂岩は、中生代のアルコーズ砂岩で、主として石英、長石、岩片および少量の黒雲母からなり、マトリックスは粘土鉱物と少量の方解石である。美唄炭鉱砂岩は、山はねを起したとみられる夾炭層砂岩で、比較的多量の長石を含み、他に石英、黒雲母および少量の岩片からなっているが、長石と黒雲母は多かれ少なかれ粘

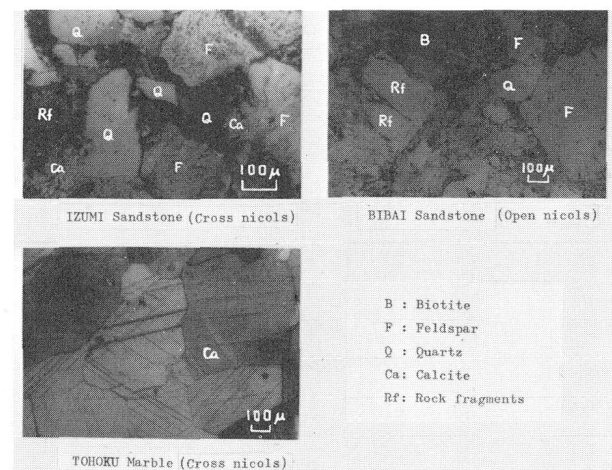
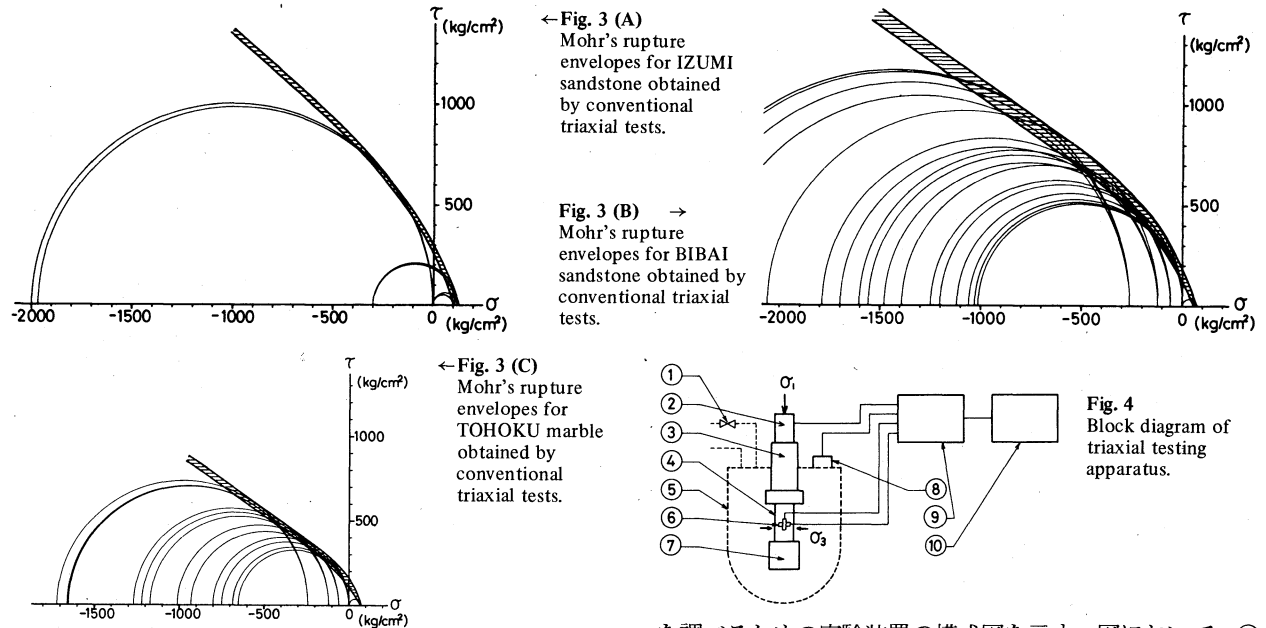


Fig. 2 Thin sec.



土化している。また、東北大理石は、古生代の白色大理石で、等粒方解石の他形結晶からなり、へき開、双晶が発達している。

それぞれの岩石試料について一軸引張試験（または圧裂引張試験）、封圧下の引張試験、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験などを行なつて得られたMohrの破壊包絡線をFig.3に示す。ただし、Fig.3-Aは和泉砂岩、Fig.3-Bは美唄炭鉱砂岩、Fig.3-Cは東北大理石によるものである。また、破壊応力円にバラツキがみられるので、破壊包絡線にも幅をもたせる方が合理的であると考えられるので、最大と最小の破壊応力円から得られる2つの破壊包絡線によりこの幅を示した。なお、本実験で使用した試験片は、25mm□×50mmの角柱形とし、試験片側面中央に相対して2枚の120Ωワイヤストレンゲージを接着した。さらに三軸圧縮試験用試験片は0.1mm厚さのビニールフィルムで被覆した。

3. 実験装置および実験方法

3・1 一軸圧縮荷重下における剛性試験

剛性試験は、容量100tの材料試験機（島津製作所製RH100型）の圧盤間に、3本のりん青銅棒により構成される剛性枠をおき、試験片と剛性枠を同時に圧縮する方法によつて行なつた。なお、剛性枠の剛性は約 1×10^6 kg/cmである。また、荷重-変位曲線は、ワイヤストレンゲージ型荷重計からの荷重と片持はり式ワイヤストレンゲージ型変位計からの変位とをX-Yレコーダに描かせて求めた。ただし、試験機容量の制約から、剛性棒上面と載荷盤の間に適当な大きさの隙間をもうけることによつて、破壊強度の約5割から剛性荷重が加わるようにした。

3・2 封圧の急速な除去試験

Fig.4に、封圧を急速に除去した場合の岩石の破壊挙動

を調べるための実験装置の模式図を示す。図において、①は電磁式バルブ（住友精密工業製）、②は軸圧測定用のワイヤストレンゲージ型荷重計、③は載荷ピストン、④は岩石試験片、⑤は三軸釜（容量24l）、⑥はクロスワイヤストレンゲージ、⑦はアンビル、⑧は封圧測定用のエンジン指圧計（新興通信工業製）、⑨は動的ひずみ計、⑩は電磁オシログラフである。

封圧と軸荷重は分離式油圧ポンプを用いて加え、電磁式バルブによつて急速な封圧の除去を行なつたが、後に示すFig.6からわかるように、封圧除去に要する時間は約0.2 secであつた。なお、使用したエンジン指圧計の固有振動数は約40 kHz、電磁オシログラフのガルバノメータの固有振動数は約1.6 kHzである。

実験にあつては、まず、低速で記録を取りつつ所定の封圧および軸圧まで試験片に圧力を加え、次に、記録紙を高速送りにして電磁バルブを開き、封圧と軸荷重および試験片の軸ひずみと横ひずみを電磁オシログラフに記録した。ただし、この場合、記録されるひずみは所定の封圧における試験片のひずみとの差、すなわち、差ひずみである。

封圧および主応力差の設定値は、破壊点付近の大きさとして、和泉砂岩では、封圧300 kg/cm²に対して主応力差約2,900 kg/cm²、美唄炭鉱砂岩については、300 kg/cm²に対して約2,200 kg/cm²、東北大理石については、200 kg/cm²に対して約1,000 kg/cm²とした。

4. 実験結果および考察

4・1 一軸圧縮荷重下の剛性試験

各種岩石試料の一軸圧縮荷重下の応力-ひずみ曲線の例をFig.5に示す。図より東北大理石については、全圧縮破壊過程における応力-ひずみ曲線（Complete stress-strain curve）が得られるが、和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩は、強度破壊点を越えると急激な破断が起ることがわかる。

したがって、これらの岩石に固有な急激な破壊のし易さは、東北大理石が最も小さいと考えられるが、和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩のそれを比較すると、美唄炭鉱砂岩は強度破壊点を越えるとすぐに急激な破断を起していることから、現象的には、これらの岩石に固有な急激な破壊のし易さは、美唄炭鉱砂岩、和泉砂岩、東北大理石の順になると考えられる。なお、岩石固有の急激な破壊のし易さは、強度破壊点以後の岩石試験片の挙動がその形状によって変化することが知られているので³⁾ 同一の形状を有する試験片で比較を行なった。

4・2 封圧を急速に除去した場合の岩石の破壊挙動

和泉砂岩、美唄炭鉱砂岩および東北大理石のそれぞれについて、封圧の急速な除去過程における電磁オシログラフの記録例をFig.6に示す。これらの図からわかる最も特徴的なことは、和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩が、封圧が0にならないうちに急激な軸圧の低下が起つて破壊するのに対して、東北大理石では軸圧の急激な低下は起さず、他の2岩種に比較してゆつくりとした破壊となることである。また、同図において、封圧がほぼ0になった後においても、軸圧は0にはならずほぼ一定値を保っていることがわかるが、これは、巨視的な破面が形成された後の破面間の摩擦すべりに対応していると思われる。なお、Fig.7に各岩石試験片の破壊形態を示した。これらの写真をみると、いずれの岩石試料においてもその破壊形態はせん断破壊とみとめられ、特に東北大理石は幅広いせん断帯を形成しているのが特徴的である。

Fig.8に、各岩石試料について、封圧の低下に対する主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)、軸ひずみ(ϵ_1)、横ひずみ(ϵ_3)および体積ひずみ($\epsilon_{vol.}$)の変化を示した。ただし、破壊がかなり進行した後のひずみの値は試験片全体の变形よりはむしろ局所的な破壊に支配されるので、ここでは軸ひずみと横ひずみの比が2以下になった場合^{a)}を点線で示し、また、急激な軸圧の低下を起した点を×印で示した。これらの図より、和泉砂岩は軸圧の急激な低下が起る直前まで主応力差がほぼ一定であるのに対して、美唄炭鉱砂岩は、主応力

差が少し低下した後に急激な破断を起し、東北大理石については、封圧の低下とともに主応力差も低下することがわかる。また、ひずみについてみると、各岩石試料とも、封圧の除去開始から軸ひずみが増加していることがわかるが、

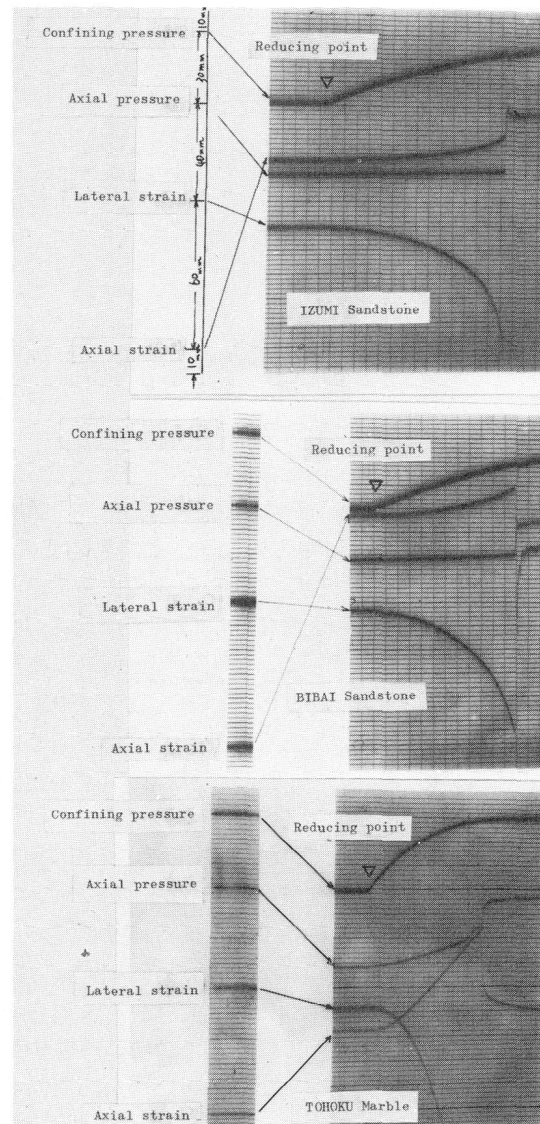


Fig. 6 Typical recordings of data in process of rapid reduction of confining pressure.

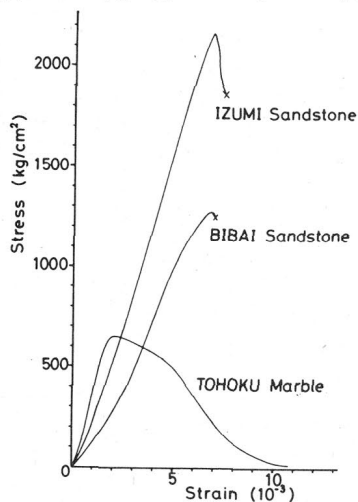
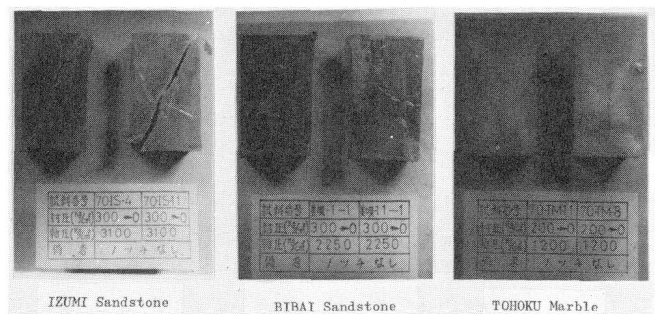


Fig. 5 Examples of stress-strain curves for rocks obtained by stiff loading tests.

Fig. 7 → Photographs of rock specimens failed by rapid reduction of confining pressure.



a) 軸ひずみと横ひずみの比が2になる点は、両ひずみとも差ひずみであるので、体積ひずみが初期封圧によって生じた値まで低下した点と一致する。

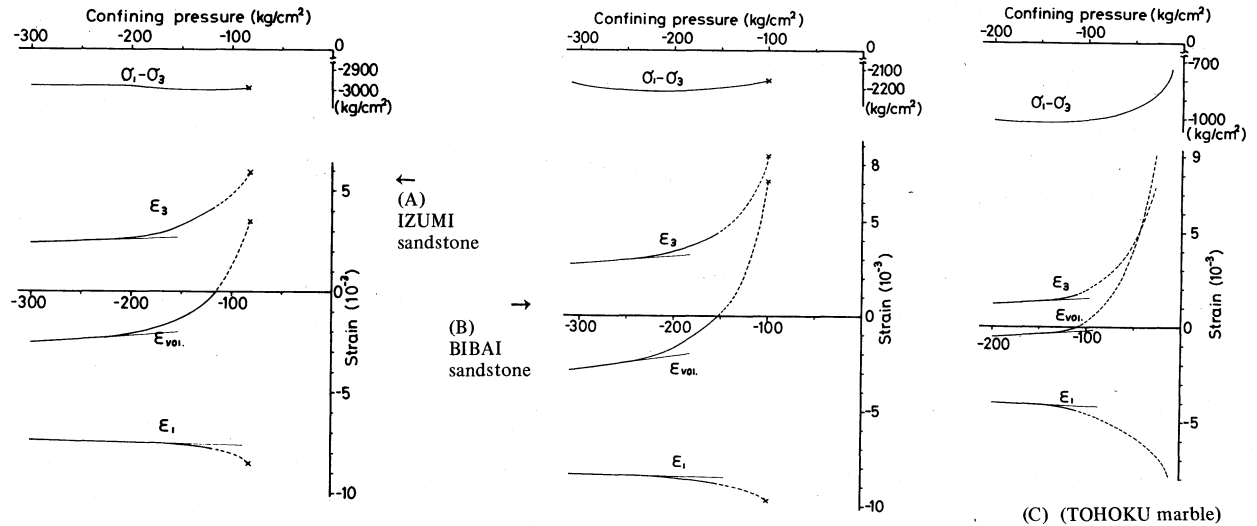


Fig. 8 Relationship among differential stress ($\sigma_1 - \sigma_3$), axial strain (ϵ_1), lateral strain (ϵ_3) and volumetric strain (ϵ_{vol}) in process of rapid reduction of confining pressure.

試験片が弾性体である場合には封圧の低下とともに、すなわち封圧の除去とともに、軸ひずみが減少するので、上記の軸ひずみの増加は封圧の除去開始から試験片内で破壊が進行していることを示している。また、この現象は、($\sigma_1 - \sigma_3$)で示される初期の設定応力円が破壊包絡線に接近しているために、封圧の除去直後から試験片内で破壊が進行したためと思われる。さらに、封圧-体積ひずみ(または横ひずみ)関係の非線形が開始するのは、封圧が初期値の7~8割に低下した時点であり、初期封圧の4~6割で、体積ひずみが0、すなわち、初期封圧によつて生じた値まで体積ひずみの低下が起つている。

次に、封圧除去によつて急激な破壊を起した和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩について、急激な破壊を起す応力条件と Fig. 3に示した通常の三軸試験、すなわち、常速軸荷重のもとにおける三軸試験から得られるMohrの破壊包絡線との比較を、それぞれFig. 9-A, Fig. 9-Bに示す。これらの図において、破線で示した応力円が設定した初期の応力状態であり、実線の応力円が急激な軸圧の低下を起した時の応力状態である。これらの図から急激な破壊を起した時点の応力円は、通常の三軸圧縮試験で得られる破壊包絡線を越えて存在していることがわかる。破壊包絡線に幅をもたせてあること、および供試した3~4個の試験片の全てが同様であることから、これらの現象が試験片間の強度のバラツキの影響を受けていないことは明らかである。

このことは、封圧の急速な除去を行なつた場合には、通常の三軸圧縮試験で破壊するのに必要なエネルギーよりもより多くのエネルギーを貯えた状態で破壊が起ることを示しており、また、過剰なエネルギーが急激な破壊の運動エネルギーとなつたことを示している。

一方、他の岩種に比較してゆつくりとした破壊が進行する東北大理石について、通常の三軸圧縮試験で得られた破壊包絡線と封圧除去過程の各点における応力円の比較を

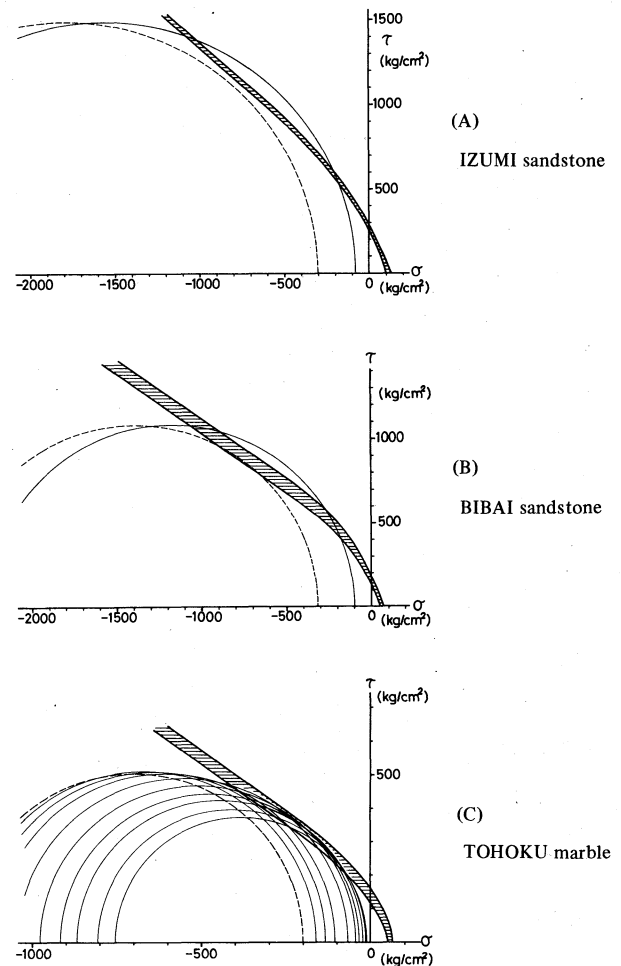


Fig. 9 Relationship between Mohr's circle at failure point in process of rapid reduction of confining pressure and Mohr's rupture envelopes obtained by conventional triaxial tests.

Fig. 9-Cに示すが、東北大理石の場合には、通常の三軸試験で得られる破壊包絡線に沿つて破壊が進行していることがわかる。すなわち、この場合には封圧の減少とともに

主応力差も減少し、急激な破壊を起すための過剰エネルギーが小さいわけである。

これらの結果は、封圧の急速な除去を行なつて得られたものであるが、より緩慢な封圧除去を行なつた場合には、東北大理石が封圧の除去速度に応じたゆつくりとした破壊になるのに対して、和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩については、この場合にも急激な破壊を起す可能性があると考えられる。

このように、急速な封圧除去における破壊挙動は岩種によつて異なることがわかつたが、この岩種間の破壊挙動の差異は、4・1節で述べた一軸圧縮荷重下の剛性試験における強度破壊点以後の破壊挙動の差異とよく一致している。すなわち、一軸圧縮荷重下で強度破壊点以後急激に破断する和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩は、急速な封圧除去によつて急激な破断をするが、一軸圧縮荷重下で強度破壊点以後ゆつくりと破壊する東北大理石は、封圧除去に応じた破壊過程を経るわけである。この岩種間の差異は、急激な破壊が岩石試験片内に貯えられた弾性ひずみエネルギーによつて起り、強度破壊点までに貯えられる弾性ひずみエネルギーが岩種によつて異なること⁴⁾によると考えられる。同時に、一軸圧縮荷重下における強度破壊点以後の破壊挙動は、岩石固有の急激な破壊のし易さ、換言すると、山はねの起し易さの指標となり得ることがわかる。

5. 結 言

山はねが生じるための必要条件として、その岩盤領域の応力状態が破壊条件を満たさなければならないことが挙げられるが、破壊条件に近づく経路としては、通常考えられている主応力差の増加以外に、最小主応力（または封圧）の減少による場合が考えられる。ここでは、最小主応力の

減少による場合を取り上げ、三軸圧縮試験を行なつて所定の応力状態まで荷重を加えた後、封圧を急速に除去した場合の岩石の破壊挙動を調べた。

その結果、一軸圧縮荷重下の剛性試験で強度破壊点以後の応力-ひずみ関係が得られた東北大理石は、封圧の除去とともに、通常の三軸圧縮試験から得られた破壊包絡線に沿つて破壊が進行するのに対して、一軸圧縮荷重下の剛性試験において強度破壊点以後、急激な破断を起した和泉砂岩と美唄炭鉱砂岩は、封圧の除去過程で急激な破壊を起し、かつ、その時の応力円が通常の三軸圧縮試験で得られる破壊包絡線を越えて存在していること、すなわち、通常の三軸試験よりもより多くのエネルギーを貯えた状態で破壊することがわかつた。このことから、岩石固有の急激な破壊のし易さが大きな岩石は、この過剰なエネルギーによつて封圧（最小主応力）の低下による急激な破壊を起し易いことが示された。したがつて、従来のような封圧一定で軸圧を増加する応力経路のみならず、主応力差一定で封圧を減少させた場合の破壊挙動をより詳細に研究する必要があると考えられる。同時に、その場合の封圧除去速度の影響や、さらには、三軸圧縮破壊過程におけるエネルギーの変化がどのようになるかなどの基礎的な問題を明らかにする必要があると考えられる。

終りに、本研究は文部省科学研究費によつて、その一部が遂行されたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Blake, W. : Q. Colorado Sch. Min., 67, 1~64, (1972)
- 2) Jaeger, J. C. and Cook, N.G.W. : Fundamentals of Rock Mechanics, 436~441, (1969)
- 3) 小林良二・杉本文男 : 日本鉱業会誌, 91, 647~652, (1975)
- 4) 西松裕一・松木浩二・小泉昇三 : 材料, 23, 374~379 (1974)

Fundamental Studies on Rock Burst

— On rupture behaviours of rock caused by rapid reduction of confining pressure in triaxial compression test —

by Ryoji KOBAYASHI¹, Koji MATSUKI² and Tadashi HAYASAKA³

It is known empirically that the rock burst is due to the geometry of underground openings, the geological circumstances, the mechanical properties of rock and the stress condition in rock. Considering only stress condition among these causes, it can be said that the rock burst occurs when the stress suddenly exceeds the strength of rock. On the viewpoint of stress condition in the triaxial compression test, the rock is failed by not only the increase of axial stress at constant confining pressure, but the decrease of confining pressure at constant differential stress.

In order to study the rupture of rock caused by the rapid reduction of confining pressure at constant differential stress, the triaxial compression test was undertaken on three kinds of rocks, namely IZUMI sandstone, BIBAI sandstone and TOHOKU marble.

The testing apparatus shown in Fig. 4 is mainly consisted of a triaxial cell, an electromagnetic operation valve used in the rapid reduction of confining pressure, a diaphragm type pressure gauge for measuring the variation of confining pressure and an electromagnetic oscillograph. The time required for reducing rapidly the confining pressure to the atmospheric one is about 0.2 second, as shown in Fig. 6.

The main results obtained in this investigation can be summarized as follows:

- (1) To measure the relative violence of rupture of these rocks, the stiff loading test was undertaken on rock specimens. It becomes clear from this test that IZUMI sandstone and BIBAI sandstone fail violently, whereas TOHOKU marble fails gently as compared with other two kinds of sandstones. It is shown in Fig. 5.
- (2) The rupture stress circles of these sandstones which are failed by rapid reduction of confining pressure exist beyond the Mohr's rupture envelope obtained by conventional triaxial compression test, as shown in Fig. 9-A and Fig. 9-B. This means that these sandstones fail violently in excessive elastic energy condition which is developed by rapid reduction of confining pressure. On the other hand, the complete stress-strain curve of TOHOKU marble is obtained as Fig. 5. Then the marble fails gently in the test. Besides, the rupture stress circle of the marble which is failed by rapid reduction of confining pressure exists near the Mohr's rupture envelope as shown in Fig. 9-C.

1. Prof., Dr., Faculty of Engineering, Tohoku Univ.
3. Nihon Kōei Co., Ltd.

2. Instructor, Dr., Faculty of Engineering, Tohoku Univ.)